

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.141068

短花针茅荒漠草原不同载畜率对土壤的影响*

丁海君^{1,2} 韩国栋^{1**} 王忠武¹ 赵和平² 张睿洋¹ 张新杰¹

(1. 内蒙古农业大学生态环境学院 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古自治区农牧业科学院 呼和浩特 010031)

摘要 以内蒙古自治区乌兰察布短花针茅荒漠草原为研究对象,通过 9 a 的定位试验,研究放牧对土壤理化性状的影响,旨在揭示不同载畜率条件下草原土壤退化的过程和机制,以便采取合理的放牧管理措施,遏制草原退化,促进草地畜牧业可持续发展。试验在短花针茅荒漠草原设定 4 个载畜率水平,重复 3 次,以成年蒙古羯羊为供试绵羊,从 2004 年开始小区放牧试验,每年放牧期为 6 月初到 11 月底,每天放牧时间为早 6:00 至晚 18:00,放牧试验 2012 年结束后,通过对草原土壤理化性质的分析,得出主要结果如下:持续放牧 9 a,土壤表层含水量随着载畜率的增加显著降低($P<0.05$),载畜率对土壤机械组成、pH 及速效磷和速效钾含量的影响未达显著水平($P>0.05$);0~10 cm 土层土壤有机质含量在重度放牧处理下显著低于($P<0.05$)其他处理;土壤容重随着放牧时间的延长下降 17.25%;随着放牧强度的增加,土壤砂粒含量呈增加趋势,黏粒含量有所降低;土壤速效磷、速效钾含量随载畜率升高而降低;2012 年重度放牧降低了土壤呼吸速率($P<0.05$)。结合载畜率与年度互作分析,经过 9 a 的持续放牧,短花针茅荒漠草原放牧还没有从本质上引起草地土壤理化性状的严重退化,但从土壤有机质含量来看,土壤出现了一定程度的退化现象。

关键词 短花针茅荒漠草原 载畜率 土壤 物理性质 化学性质

中图分类号: S812.2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2016)04-0524-08

Effect of stocking rate on *Stipa breviflora* desert steppe soil*

DING Haijun^{1,2}, HAN Guodong^{1**}, WANG Zhongwu¹, ZHAO Heping², ZHANG Reiyang¹, ZHANG Xinjie¹

(1. College of Ecology and Environmental Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China;

2. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Science, Hohhot 010031, China)

Abstract Grassland grazing ecosystem is one of the most efficient consumption systems of the terrestrial ecosystem. There are few repeated studies on long-term effects of stocking rate on stability of grazing ecosystems. With Inner Mongolia Wulanchabu *Stipa Breviflora* desert steppe as a case study, nine years stationary experiment was conducted to study the effect of grazing on soil physical and chemical properties. The study tested the processes and mechanisms of soil degradation at different stocking rates with the aim of beneficial adoption of reasonable grazing management measures and promoting sustainable development of grassland animal husbandry. A randomized complete block design was set up with four stocking rate treatments and three replicates. The stocking rate treatments included the control [non-grazed enclosure (CK)], light stocking rate (LG), moderate stocking rate (MG) and heavy stocking rate (HG). Adult Mongolia sheep were used in continuous grazing system from June to November of each year in 2004–2012. The stocking rates were 0 sheep·hm⁻² (CK), 0.91 sheep·hm⁻² (LG), 1.82 sheep·hm⁻² (MG) and 2.71 sheep·hm⁻² (HG). Soil physical and chemical properties were measured in

* 国家自然科学基金项目(31260124, 31070413, 31100330, 31260123)、教育部博士点学科专项基金项目(20121515120015)、中农-内农两校合作基金(ZN201111)、科技部“十二五”科技支撑项目(2012BAD13B02)和内蒙古农牧业科学院青年创新基金项目(2011QNJJM13)资助

** 通讯作者: 韩国栋, 主要研究方向为草地生态学。E-mail: nmghanguodong@163.com

丁海君, 主要从事草地生态学研究。E-mail: dinghaijun99@163.com

收稿日期: 2015-04-07 接受日期: 2015-08-06

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31260124, 31070413, 31100330, 31260123), the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (No. 20121515120015), China Agricultural University-Inner Mongolia Agricultural University Cooperation Fund (No. ZN201111), the National Key Technology Research and Development Program (No. 2012BAD13B02) and the Youth Innovation Fund Project of Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry Science (No. 2011QNJJM13).

** Corresponding author, E-mail: nmghanguodong@163.com

Received Apr. 7, 2015; accepted Aug. 6, 2015

2004–2012. The results showed that soil water content in the topsoil decreased significantly with increasing stocking rate after 9 years of continuous grazing. Soil bulk density decreased by 17.25% with extended grazing time ($P < 0.05$), but not significantly changed with stocking rate. The stocking rate had no significant influence on soil mechanical composition, pH, and contents of available phosphorus and potassium. However, soil organic matter significantly decreased ($P < 0.05$) in the 0–10 cm soil depth under HG treatment compared with other treatments. With increasing stocking rate, the content of sand in the soil increased and that of clay decreased. Also HG treatment significantly decreased soil respiration rate in 2012. Based on statistical results of stocking rate, stocking year and their interactions, soil physical and chemical conditions of *S. breviflora* desert steppe did not significantly change over the nine years of grazing. However, organic matter apparently showed a certain degree of degradation. Because of resilience, hysteresis and complexity of natural soil systems, it was recommended that studies on the effects of stocking rates on soil bulk density should be done for longer time periods.

Keywords *Stipa breviflora* desert steppe; Stocking rate; Soil system; Physical property; Chemical property

在放牧生态系统中,“草–土–畜”是紧密联系、不可分割的整体,土壤作为草地生物量生产最重要的基质,能够储存大量营养物质,同时也是动、植物分解和物质循环的主要场所,是牧草和家畜生产的载体。放牧过程中,家畜通过采食、践踏、排泄等行为减少生态系统生物量,改变植物冠层结构,改变群落组成,调节输入到土壤中凋落物的化学组成,使输入到土壤中的排泄物增加,引起植物根系分泌物的增加或减少,并影响土壤微气候等^[1],从而直接或间接地对土壤理化性质和土壤微生物产生影响^[2–3]。因此,研究不同载畜率对土壤理化特性的影响,探讨草地土壤退化的过程和机制,对遏止草地退化、保证草牧业可持续发展,实现人与草地的和谐发展具有重要意义。

前人研究^[4–7]表明,放牧过程中地上生物量减少,提高了土壤温度,降低土壤湿度。随着载畜率增大,地表枯落物覆盖率降低,有机质循环过程变弱,土壤肥力渐渐下降,土壤表层易发生水土流失,土壤板结,草地退化^[8]。Holt等^[9]通过研究发现,高的放牧压力显著降低土壤容重。Winter等^[10]研究证实放牧绵羊的践踏增加表土紧实度。然而,这些研究仅限于放牧过程对土壤的影响。在我国学者们针对不同类型的草地进行了研究^[11–16],结果均表明:随着载畜率增加,土壤容重增大,且随土壤深度增加,土壤容重逐渐增大,这与Greenwood等^[17]的研究结论相同;而贾树海等^[18]却指出重度载畜率条件下表层土壤紧实度和土壤容重反而降低。关于放牧对土壤有机质的影响,有的认为放牧对土壤有机质含量没有影响^[19],有的研究发现放牧提高了土壤有机质含量^[20],亦有报道放牧降低了土壤有机质含量^[21]。在关于土壤速效养分对放牧强度的响应方面^[22–24],由于受环境因素和土壤性质的影响,研究结果也大相径庭。

综上所述,虽然大量学者研究了放牧强度对土

壤的影响,但因所在区域草地类型、放牧制度、牧压梯度、放牧时间、土壤状况、家畜类型等各个方面的差异,导致研究结果没有一致性,而且在荒漠草原区中长期的放牧时间尺度上的研究甚少。为此,本试验选择短花针茅(*Stipa breviflora*)荒漠草原为研究对象(其处于干旱半干旱的生态脆弱区,是草原向荒漠过度的旱生化草原生态类型,生态系统承受和抵御干扰的能力十分脆弱,土壤贫瘠且基质不稳定),通过9 a的定位监测,研究了不同载畜率对土壤理化性状的影响,探讨其对放牧的响应规律,以为草地适宜放牧强度的确立及其合理利用提供科学依据。

1 试验区概况及研究方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗王府一队,地处41°47'17"N、111°53'46"E,海拔1450 m。属典型中温带大陆性气候,年均降雨量280 mm,春季干旱多风,夏季炎热。蒸发量是降雨量的7~10倍,湿润度0.15~0.3,土壤风蚀模数为2000~9147 t·km⁻²·a⁻¹,属中等强度侵蚀。土壤为淡栗钙土。

该地区属短花针茅荒漠草原,这种草地类型占温性荒漠草原类总面积的11.2%。试验区植被平均高度为8 cm,植被稀疏,盖度为5%~18%,种类组成较少,植物群落主要由20余种植物组成。建群种为短花针茅,优势种为冷蒿(*Artemisia frigida*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*),主要伴生种有阿氏旋花(*Convolvulus ammannii*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、栉叶蒿(*Neopallasia pectinata*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、狭叶锦鸡儿(*Calagana stenophylla*)等。

1.2 试验设计

放牧试验从2004年6月开始,采用完全随机区组设计,将围栏放牧区划分为3个随机区组,作为重复。每个区组内设有4个不同处理:对照(CK,载畜

率为0)、轻度载畜率(LG, 载畜率为0.91羊单位·hm⁻²)、中度载畜率(MG, 载畜率为1.82羊单位·hm⁻²)和重度载畜率(HG, 载畜率为2.71羊单位·hm⁻²), 随机排列。各试验小区面积均为4.4 hm²。

供试绵羊为成年蒙古羯羊, 每年放牧期为6月初到11月底, 共计6个月, 每天放牧时间早6:00至晚18:00。

1.3 采样和测定方法

小区内土壤取样方法采取完全随机取样。土壤含水量取样时, 每个小区3个取样点, 以10 cm的间隔从表层取样至20 cm深度, 3次重复, 用直径2 cm的土钻取样, 称湿重, 放于105℃烘箱中烘干24 h直至恒重, 称其干重, 每年6—10月份取样, 每月1次, 计算其平均值计为土壤含水量。土壤容重用土壤环刀($V=100\text{ cm}^3$)取地表5 cm土样, 同时置于铝盒中带回实验室105℃烘箱中连续烘至恒重, 称干重计算土壤容重。

土壤化学性质8月份取样, 用直径为2 cm的土钻按0~10 cm、10~20 cm两层取样, 每个小区取3个样品, 每个样品为3个样点的混合样, 土样室内风干后, 过0.15 mm和2 mm的筛。小粒径土样用于土壤有机质(SOM)测定, 测定方法为重铬酸钾容量法-外加热法; 大粒径用于土壤机械组成和速效养分(速效钾、速效磷)的测定, 土壤机械组成用比重计法测定, 土壤速效磷采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃法测定, 土壤速效钾采用NH₄OAc浸提, 火焰光度法测定^[25]。

土壤呼吸速率使用LI-6400 (LI-COR, USA)和土壤呼吸叶室(LI-6400-09, LI-COR, USA)连接进行测定。测定时8月份选择晴朗天气, 提前24 h将直径为10.5 cm、高为8 cm的PVC管埋于测定小区内, 高出地表2 cm, 每个小区3次重复。测定前, 清除管内植物及凋落物。测定时, 叶室内的红外气体分析仪自动记录土壤呼吸速率、叶室中的相对湿度等数据, 测定结束后, 将数据导入电脑进行分析计算。

土壤理化性状各指标取样时间为2004年, 放牧9 a后, 即2012年进行再次取样分析。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2010进行数据统计和构建图表, 采用SAS 9.0软件包检验不同处理、年际及交互之间的方差分析、回归分析模块对相关数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同载畜率对草原土壤含水量的影响

从载畜率对土壤含水量的影响(表1)来看, 2004

年放牧初期, 0~10 cm土层土壤含水量轻度放牧区显著高于对照和重度放牧区, 中度放牧区和重度放牧区差异不显著; 10~20 cm土层土壤含水量轻度放牧区和中度放牧区显著高于对照, 而与重度放牧区差异不显著。2012年, 0~10 cm土层土壤含水量重度放牧区显著低于对照, 与轻度放牧区和中度放牧区差异不显著; 10~20 cm土层土壤含水量重度放牧区显著低于对照, 与轻度放牧区和中度放牧区差异不显著。不同载畜率对土壤含水量的影响显著, 载畜率与年度的交互作用对土壤含水量的影响显著, 2012年0~10 cm土层土壤含水量重度放牧区较对照下降13.62%, 10~20 cm土层土壤含水量重度放牧区较对照下降12.16%。

表1 载畜率对2004年(试验开始前)和2012年(放牧9年后)草原不同土层土壤含水量影响

Table 1 Effect of stocking rate on soil water content of different layers of grassland in 2004 (before the experiment) and 2012 (after grazing for 9 years)

载畜率 Stocking rate	2004年 Year 2004		2012年 Year 2012	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
CK	6.18±0.64b	6.52±0.55b	10.28±2.15a	8.72±1.85a
LG	8.45±2.50a	7.55±0.85a	9.49±1.93ab	8.15±1.82ab
MG	6.75±1.21ab	7.35±0.82a	9.13±1.73b	7.93±1.78b
HG	6.28±0.90b	6.77±0.57ab	8.88±1.61b	7.66±1.54b
变异来源 Source of variation			P值 P value	
载畜率 Stocking rate (SR)			0.008 7	
年度 Year (Yr)			<0.000 1	
土层深度 Soil depth (Dep)			0.005 7	
Yr × Dep			0.000 5	
SR × Dep			0.458 7	
SR × Yr			0.000 6	
Yr × SR × Dep			0.523 7	

CK、LG、MG和HG分别代表对照、轻度载畜率、中度载畜率和重度载畜率; 同列不同小写字母表示不同载畜率间差异显著($P<0.05$), 下同。CK, LG, MG and HG represent the control, light stocking, moderate stocking and heavy stocking, respectively. Data in a column followed by different lowercase letters are significantly different at $P<0.05$ level. The same below.

2.2 不同载畜率对草原土壤容重和机械组成的影响

放牧家畜的践踏行为影响土壤容重。不同载畜率对土壤容重的影响见图1, 载畜率与年度的交互作用及载畜率都对土壤容重无显著影响。2004年不同放牧处理小区之间土壤容重无显著差异。经过9 a的放牧, 土壤容重随着载畜率的增加有下降的趋势, 但变化并不显著。2012年土壤容重平均值1.36 g·cm⁻³, 2004年土壤容重平均值1.64 g·cm⁻³, 2012年土壤容重下降17.25%。

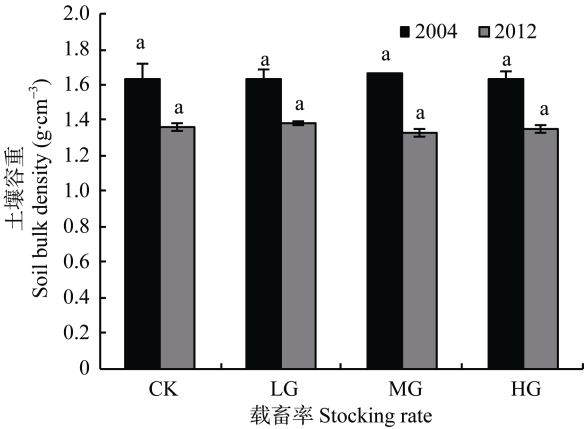


图 1 载畜率对 2004 年(试验开始前)和 2012 年(放牧 9 年后)草原土壤容重变化的影响

Fig. 1 Effect of stocking rate on soil bulk density of grassland in 2004 (before the experiment) and 2012 (after grazing for 9 years) 不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著, 下同。Bar with different letters are significantly different ($P < 0.05$). The same below.

载畜率对土壤机械组成的影响见表 2, 可以看出载畜率对土壤表层的机械组成并没有产生显著影响, 各处理和对照均以砂粒的比例最大, 粉粒和黏粒次之, 这是该地区土壤母质性质决定的。2004 年放牧初期, 不同处理区表层(0~10 cm)土壤均属于砂质壤土, 经过 9 a 的放牧时间, 2012 年土壤表层砂粒含量有升高的趋势, 黏粒含量呈下降趋势, 但未达到显著, 土壤表层仍属于砂质壤土。

2.3 不同载畜率对草原土壤 pH 和有机质含量的影响

土壤 pH 变化结果表明(表 3), 2004 年从对照区到轻度放牧区到重度放牧区, 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤 pH 均先降低再升高, 且均以重度放牧区 pH 最高, 轻度放牧区最小, 但差异不显著; 10~20 cm 土层 pH 略高于表层(0~10 cm)土壤。2012 年土壤 pH 对照区最低, 重度放牧区仍然最高, 但差异不显著。

表 2 载畜率对 2004 年(试验开始前)和 2012 年(放牧 9 年后)草原土壤机械组成(0~10 cm)的影响

Table 2 Effect of stocking rate on soil particle size distribution (0~10 cm depth) of grassland in 2004 (before the experiment) and 2012 (after grazing for 9 years) %

载畜率 Stocking rate	砂粒 Sand		粉粒 Silt		黏粒 Clay	
	2004	2012	2004	2012	2004	2012
CK	66.51±4.12a	70.68±4.06a	19.60±3.06a	16.07±3.52a	13.90±2.33a	13.26±3.39a
LG	64.02±4.31a	70.95±4.04a	22.04±3.93a	16.58±3.25a	13.95±1.76a	12.48±1.93a
MG	65.53±4.13a	71.28±4.30a	20.77±2.35a	15.40±2.08a	13.70±3.10a	13.32±2.81a
HG	65.15±4.05a	72.01±3.51a	21.06±3.21a	15.82±2.63a	13.79±2.42a	12.17±2.63a
变异来源 Source of variation	P 值 P value					
年度 Year (Yr)	<0.001		0.040		<0.001	
载畜率 Stocking rate (SR)	0.939		0.991		0.150	
Yr × SR	0.113		0.111		0.116	

表 3 载畜率对 2004 年(试验开始前)和 2012 年(放牧 9 年后)草原土壤不同层次 pH 和有机质含量的影响

Table 3 Effect of stocking rate on soil pH and organic matter content in different layers of grassland in 2004 (before the experiment) and 2012 (after grazing for 9 years)

载畜率 Stocking rate	pH				有机质含量 Organic matter content (g·kg ⁻¹)			
	2004 年 Year 2004		2012 年 Year 2012		2004 年 Year 2004		2012 年 Year 2012	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
CK	7.66±0.28a	8.07±0.28a	7.86±0.27a	7.87±0.21a	26.82±1.25a	23.16±1.06a	22.79±3.43a	17.76±0.56a
LG	7.55±0.23a	7.87±0.23a	7.91±0.26a	7.92±0.22a	24.54±1.24a	19.52±1.40b	27.68±2.30a	24.23±1.70b
MG	7.67±0.28a	7.95±0.38a	7.93±0.24a	7.94±0.23a	23.56±2.42a	20.47±0.99a	22.46±2.05a	17.15±2.55a
HG	7.84±0.38a	8.15±0.28a	7.94±0.22a	7.95±0.24a	23.93±2.42a	20.51±0.68a	21.55±1.08b	16.72±0.73a
变异来源 Source of variation	P 值 P value							
载畜率 Stocking rate (SR)	0.181				0.173			
年度 Year (Yr)	0.040				0.042			
土层深度 Soil depth (Dep)	<0.001				<0.001			
Yr × Dep	0.059				0.039			
SR × Dep	0.063				0.420			
SR × Yr	0.091				0.090			
Yr × SR × Dep	0.864				0.752			

载畜率及载畜率与年度的交互作用对 pH 影响不显著, 随载畜率增加, 土壤 pH 有所增加, 盐碱化程度增加, 且 10~20 cm 土层大于表层土壤。

对于草地生态系统来说, 经过几年的放牧时间, 不同载畜率条件下, 不同土壤深度土壤有机质有所变化。从表 3 可以看出, 2004 年, 放牧的第 1 年, 随着载畜率增加, 土壤有机质含量呈下降趋势, 但重度放牧区与其他处理间差异未达显著水平。2012 年, 0~10 cm 土壤有机质含量重度放牧区显著低于其他处理, 而此时, 轻度放牧处理下土壤有机质含量最高; 在 10~20 cm 土层轻度放牧区土壤有机质含量显著高于其他处理小区, 重度放牧区土壤有机质含量最低。

经过 9 a 的放牧, 土壤有机质含量在中度和重度放牧小区均呈下降趋势, 土壤表层趋势变化不显著, 而 10~20 cm 土层变化显著。2004 年 0~10 cm 和 10~20 cm 土层有机质含量平均值分别为 $24.71 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20.92 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 2012 年分别为 $23.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $18.97 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与 2004 年相比分别下降 4.41% 和 9.32%。

2.4 不同载畜率对草原土壤速效养分的影响

通过数据分析可以看出(表 4), 年度和深度对土壤速效磷含量影响显著($P<0.05$), 土层深度和年度、载畜率与土层深度、载畜率与年度的交互作用及 3 因素的交互作用对速效磷含量影响不显著($P>0.05$); 土壤速效钾含量只在不同土层间差异显著, 载畜率和年度对其无显著影响($P>0.05$)。

2004 年 0~10 cm 土层土壤速效磷含量不同处理

间无显著差异; 10~20 cm 土层重度放牧区土壤速效磷含量与轻度放牧区无显著差异, 但显著高于与其他处理($P<0.05$), 对照区与轻度放牧区和中度放牧区无显著差异。2012 年, 经历 9 a 的放牧后, 土壤表层速效磷含量在重度放牧区显著低于对照区和轻度放牧区($P<0.05$), 与中度放牧区无显著差异($P>0.05$); 10~20 cm 土层中, 重度放牧区土壤速效磷含量与中度放牧区无显著差异, 但显著低于其他处理区($P<0.05$), 且其他 3 个处理区之间差异不显著($P>0.05$)。2012 年对照区和中度放牧区两土层、轻度放牧区 0~10 cm 土层土壤速效磷含量均高于 2004 年, 重度放牧区两土层土壤速效磷含量均低于 2004 年($P<0.05$)。重度放牧区 0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层分别下降 46.90% 和 46.39%。

从表 4 可以看出, 2004 年两土层对照区土壤速效钾含量最高, 中度放牧区略低于对照区, 但差异不显著; 对照区与中度放牧区显著高于另外两个处理。2012 年 0~10 cm 土层土壤速效钾含量在重度放牧区最低, 但与其他处理差异未达显著水平($P>0.05$); 10~20 cm 土层轻度放牧区和中度放牧区土壤速效钾含量差异显著, 中度放牧区含量最低, 但与对照和重度放牧区无显著差异($P>0.05$)。2012 年土壤表层速效钾平均含量 $147.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较 2004 年下降 23.75%; 10~20 cm 土层平均含量 $146.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较 2004 年升高 76.36%; 轻度和重度放牧区 10~20 cm 土层差异达显著水平($P<0.05$)。

表 4 不同载畜率对 2004 年(试验开始前)和 2012 年(放牧 9 年后)草原不同土层土壤速效养分含量的影响

Table 4 Effect of stocking rate on soil available nutrients contents in different layers of grassland in 2004 (before the experiment) and 2012 (after grazing for 9 years)

载畜率 Stocking rate	速效磷 Available phosphorus ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)				速效钾 Available potassium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)			
	2004 年 Year 2004		2012 年 Year 2012		2004 年 Year 2004		2012 年 Year 2012	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
CK	$4.86\pm0.61\text{a}$	$3.11\pm0.64\text{a}$	$5.16\pm0.50\text{a}$	$6.24\pm0.54\text{a}$	$244.62\pm20.11\text{c}$	$107.20\pm5.70\text{b}$	$172.85\pm48.84\text{a}$	$153.84\pm15.13\text{ab}$
LG	$4.86\pm1.00\text{a}$	$5.92\pm1.11\text{ab}$	$5.46\pm1.21\text{a}$	$5.45\pm1.01\text{a}$	$138.51\pm23.48\text{a}$	$67.35\pm16.99\text{a}$	$144.52\pm48.36\text{a}$	$165.39\pm11.67\text{b}$
MG	$3.59\pm0.82\text{a}$	$3.89\pm0.76\text{a}$	$4.94\pm0.51\text{ab}$	$4.24\pm0.32\text{ab}$	$225.11\pm29.81\text{bc}$	$93.12\pm12.43\text{ab}$	$137.07\pm45.56\text{a}$	$125.52\pm14.16\text{a}$
HG	$6.29\pm1.09\text{a}$	$7.07\pm1.01\text{b}$	$3.34\pm0.51\text{b}$	$3.79\pm0.42\text{b}$	$164.80\pm19.61\text{ab}$	$64.14\pm5.41\text{a}$	$135.01\pm28.87\text{a}$	$140.42\pm5.56\text{ab}$
变异来源 Source of variation	P 值 P value				P 值 P value			
载畜率 Stocking rate (SR)	0.168				0.198			
年度 Year (Yr)	0.040				0.114			
土层深度 Soil depth (Dep)	<0.001				<0.001			
Yr \times Dep	0.084				0.034			
SR \times Dep	0.075				0.016			
SR \times Yr	0.446				0.265			
Yr \times SR \times Dep	0.390				0.380			

2.5 不同载畜率对草原土壤呼吸速率的影响

从土壤呼吸速率的测定结果(表 5)来看, 年度和载畜率对土壤呼吸速率有显著影响($P<0.05$), 2004 年度轻度放牧区高于其他处理小区, 但方差分析结果表明,

差异不显著($P>0.05$)。2012 年重度载畜率条件下土壤呼吸速率明显降低($P<0.05$), 土壤呼吸速率随着载畜率的升高有所下降。不同年度之间, 土壤呼吸速率 2012 年平均值 $1.57 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 较 2004 年升高 25.6%。

表 5 不同载畜率对 2004 年(试验开始前)和 2012 年(放牧 9 年后)草原土壤呼吸速率的影响

Table 5 Effect of stocking rate on soil respiration rate of grassland in 2004 (before the experiment) and 2012 (after grazing for 9 years)

	CK	LG	MG	HG
2004	1.23±0.26a	1.33±0.15a	1.16±0.42a	1.26±0.28a
2012	1.75±0.24a	1.72±0.31ab	1.42±0.16ab	1.40±0.17b
变异来源 Source of variation	P 值 P value			
载畜率 Stocking rate (SR)	0.033			
年度 Year (Yr)	0.001			

3 讨论

在放牧生态系统中, 土壤作为地境, 与牧草、家畜紧密联系, 相互作用, 既与放牧生态系统的历史有关, 又在某种程度上预示着放牧生态系统的未来^[26]。

土壤含水量是衡量土壤坚实度和土壤渗透率的重要指标之一^[27], 放牧家畜通过采食改变植物叶面积, 同时伴随家畜的践踏作用, 土壤渗透率受到影响, 从而影响土壤含水量。随着载畜率的增加, 放牧时间的延长, 家畜践踏的不断作用, 草地土壤表面孔隙度减小, 阻止水分向表层运动, 导致土壤紧实度显著增大^[28], 土壤保水和持水能力下降, 土壤含水量降低, 这与红梅等^[29]的研究结果一致。载畜率的增加对土壤容重影响未达到显著水平, 在 2012 年土壤容重较 2004 年有所下降, 这是因为在有机质含量很低的沙质土壤中, 较高的放牧强度造成有机质含量降低, 土壤的团粒结构减少, 稳定性团聚体减少, 土壤中砂粒含量增加, 黏粒含量减低而使得土壤容重反而降低^[18], 而且在本研究中, 土壤表层有机质含量随着载畜率的增加显著降低, 这与白永飞等^[30]对锡林河草地生态系统的研究结果一致, 这是由于放牧使植物群落地表植被、枯枝落叶减少, 表层土壤温度增加, 表土有机质矿化速度加强, 使土壤表层有机质含量降低。

土壤中的速效养分是草地上植物最直接、快捷的营养来源。土壤速效磷含量则随土壤类型、气候、管理水平、利用程度等而不同。从试验结果来看, 载畜率对草地土壤速效养分没有明显的影响, 土壤速效磷、速效钾含量随载畜率升高而降低, 这与 Johnston 等^[31]的研究结果相反, 一个放牧 40 a 的重度

放牧草地全磷降低, 而速效磷则增加, 是因为放牧使草地地上、地下生物量和归还量降低的结果, 而在本研究中是由于载畜率较高的情况下, 草食动物频繁的采食使速效养分从系统中的输出增加, 引起土壤中全效养分的各组分向速效养分的转移量增大, 通过植物吸收后转向系统外输出, 从而导致土壤速效养分含量减少。

根据目前草地的土壤理化状况来看, 放牧还没有从本质上引起草地土壤发生本质上的改变。土壤含水量高时, 践踏有压实效应^[32], 上层土壤紧实, 容易产生地表径流, 根系缺氧。土壤水分匮乏时, 践踏对表土有“蹄耕”效应, 引起土表疏松, 容易风蚀^[33], 由于切断了土壤毛细管, 蒸发也会下降。“蹄耕”和压实效应不仅损害土壤, 也伤害植物, 最终损伤整个生态系统, 因此关于载畜率对土壤的影响还需要结合家畜的践踏作用, 但该方面的研究报道很少, 此外, 鉴于土壤系统本身的弹性、滞后性和复杂性, 关于载畜率对土壤容重的影响仍需要更长时间尺度上的研究。

4 结论

2004 年放牧开始持续至 2012 年放牧 9 a 时间, 短花针茅荒漠草原不同载畜率对土壤含水量产生显著影响, 载畜率对土壤机械组成、土壤 pH、速效磷、速效钾的影响未达显著水平($P>0.05$); 土壤容重随着放牧时间的延长下降 17.25%; 重度放牧处理小区土壤有机质含量在 0~10 cm 土层显著降低($P<0.05$); 随着放牧强度的增加, 土壤中砂粒含量呈增加趋势, 黏粒含量有所降低; 土壤速效磷、速效钾含量随载畜率升高而降低; 2012 年重度放牧区土壤呼吸速率降低($P<0.05$)。

参考文献 References

- [1] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 等. 译. 北京: 高等教育出版社, 2007: 204–210
Luo Y Q, Zhou X H. Soil Respiration and the Environment[M]. Jiang L F, Qu L Y, Zhou Y M, et al, Trans. Beijing: Higher Education Press, 2007: 204–210
- [2] 高英志, 韩兴国, 汪诗平. 放牧对草原土壤的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 790–797
Gao Y Z, Han X G, Wang S P. The effects of grazing on grassland soils[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 790–797
- [3] 苏都, 红梅, 陈有君, 等. 放牧强度对荒漠草原淡栗钙土水分、养分及生物量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报, 2011, 32(3): 132–137
Su D, Hong M, Chen Y J, et al. The effects of grazing intensity on light chestnut soil moisture, nutrients and biomass of desert steppe[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2011, 32(3): 132–137
- [4] Ford H, Garbutt A, Jones L, et al. Methane, carbon dioxide and nitrous oxide fluxes from a temperate salt marsh: Grazing management does not alter global warming potential[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2012, 113: 182–191
- [5] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, et al. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau[J]. Soil Biol & Biochem, 2004, 36(2): 237–243
- [6] Lin X W, Zhang Z H, Wang S P, et al. Response of ecosystem respiration to warming and grazing during the growing seasons in the alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Agric Fore Meteorol, 2011, 151(7): 792–802
- [7] Wang Y F, Cui X Y, Hao Y B, et al. The fluxes of CO₂ from grazed and fenced temperate steppe during two drought years on the Inner Mongolia Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2011, 410/411: 182–190
- [8] 郭继勋, 祝廷成. 羊草草原枯枝落叶积累的研究——自然状态下枯枝落叶的积累及放牧、割草对积累量的影响[J]. 生态学报, 1994, 14(3): 255–259
Guo J X, Zhu T C. Study on the litter accumulation in a *Leymus chinensis* grassland: The litter accumulation under natural conditions and the effects of grazing and cutting on litter accumulation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1994, 14(3): 255–259
- [9] Holt J A, Bristow K L, Meivior J G. The effects of grazing pressure on soil animals and hydraulic properties of two soils in semi-arid tropical Queensland[J]. Australian Journal of Soil Research, 1996, 34(1): 69–79
- [10] Winter S R, Unger P W. Irrigated wheat grazing and tillage effects on subsequent dryland grain sorghum production[J]. Agronomy Journal, 2001, 93(3): 504–510
- [11] 李建龙, 许鹏, 孟林, 等. 不同轮牧强度对天山北坡低山带蒿属荒漠春秋场土草畜影响研究[J]. 草业学报, 1993, 2(2): 60–65
Li J L, Xu P, Meng L, et al. The comprehensive effects of different rotational grazing intensities (DRGI) on the soil, grassland and sheep production in a spring-autumn pasture of sagebrush desert in the northern slope of Tianshan Mountain[J]. Acta Prataculturae Sinica, 1993, 2(2): 60–65
- [12] 王仁忠. 放牧干扰对松嫩平原羊草草地的影响[J]. 东北师范大学学报: 自然科学版, 1996(4): 77–82
Wang R Z. Effects of grazing on disturbance on *Leymus chinensis* grassland in Songnen Plain[J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 1996(4): 77–82
- [13] 关世英, 文沛钦, 康师安, 等. 不同牧压强度对草地土壤养分含量的影响[M]//草原生态系统研究(第5集). 北京: 科学出版社, 1997: 17–22
Guan S Y, Wen P Q, Kang S A, et al. Effect of grazing capacity on nutrient of steppe soil[M]//Grassland Ecosystem Research (5 Sets). Beijing: Science Press, 1997: 17–22
- [14] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 等. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响[J]. 中国草地, 2001, 23(4): 41–47
Rong Y P, Han J G, Wang P, et al. The effects of grazing intensity on soil physics and chemical properties[J]. Grassland of China, 2001, 23(4): 41–47
- [15] 王玉辉, 何兴元, 周广胜. 放牧强度对羊草草原的影响[J]. 草地学报, 2002, 10(1): 45–49
Wang Y H, He X Y, Zhou G S. Study on the responses of *Leymus chinensis* steppe to grazing in Songnen Plain[J]. Acta Agrestia Sinica, 2002, 10(1): 45–49
- [16] 王长庭, 王启兰, 景增春, 等. 不同放牧梯度下高寒小嵩草草甸植被根系和土壤理化特征的变化[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 9–15
Wang C T, Wang Q L, Jing Z C, et al. Vegetation roots and soil physical and chemical characteristic changes in *Kobresia pygmaea* meadow under different grazing gradients[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(5): 9–15
- [17] Greenwood K L, MacLeod D A, Hutchinson K J. Long-term stocking rate effects on soil physical properties[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1997, 37(4): 413–419
- [18] 贾树海, 王春枝, 孙振涛, 等. 放牧强度和时期对内蒙古草原土壤压实效应的研究[J]. 草地学报, 1999, 7(3): 217–222
Jia S H, Wang C Z, Sun Z T, et al. Study on grassland dark sandy chestnut compaction by grazing intensity and grazing season[J]. Acta Agrestia Sinica, 1999, 7(3): 217–222
- [19] 王艳芬, 陈佐忠, Tieszen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545–551
Wang Y F, Chen Z Z, Tieszen L T. Distribution of soil organic carbon in the major grassland of Xilinguole, Inner Mongolia, China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22(6): 545–551
- [20] Schuman G E, Reeder J D, Manley J T, et al. Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland[J]. Ecological Applications, 1999, 9(1): 65–71
- [21] Han G D, Hao X Y, Zhao M L, et al. Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 125(1/4): 21–32
- [22] Pei S F, Fu H, Wan C G. Changes in soil properties and vegetation following exclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China[J]. Agriculture,

- Ecosystems & Environment, 2008, 124(1/2): 33–39
- [23] 侯扶江, 任继周. 甘肃马鹿冬季放牧践踏作用及其对土壤理化性质影响的评价[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 486–495
Hou F J, Ren J Z. Evaluation on trampling of grazed Gansu wapiti (*Cervus elaphus kansuensis* Pocock) and its effects on soil property in winter grazing land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(3): 486–495
- [24] Smoliak S, Dormaar J F, Johnston A. Long-term grazing effects on Stipa-Bouteloua prairie soils[J]. Journal of Range Management, 1972, 25(4): 246–250
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [26] 侯扶江, 杨中艺. 放牧对草地的作用[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 244–264
Hou F J, Yang Z Y. Effects of grazing of livestock on grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 244–264
- [27] 范春梅, 廖超英, 李培玉, 等. 放牧对黄土高原丘陵沟壑区林草地土壤理化性状的影响[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(2): 1–4
Fan C M, Liao C Y, Li P Y, et al. Effects of grazing on soil physical and chemical properties of grassland and forest floor in hilly and gully regions on the loess plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(2): 1–4
- [28] Weigel J R, Britton C M, McPherson G R. Trampling effects from short-duration grazing on tobosagrass range[J]. Journal of Range Management, 1990, 43(2): 92–95
- [29] 红梅, 陈有君, 李艳龙, 等. 不同放牧强度对土壤含水量及地上生物量的影响[J]. 内蒙古农业科技, 2001(土肥专辑): 25–26
Hong M, Chen Y J, Li Y L, et al. Effect of different grazing intensity on soil moisture and aboveground biomass[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2001 (Soil and Fertilizer Album): 25–26
- [30] 白永飞, 张丽霞, 张焱, 等. 内蒙古锡林河流域草原群落植物功能群组成沿水热梯度变化的样带研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3): 308–316
Bai Y F, Zhang L X, Zhang Y, et al. Changes in plant functional composition along gradients of precipitation and temperature in the Xilin River basin, Inner Mongolia[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(3): 308–316
- [31] Johnston A, Dormaar J F, Smoliak S. Long-term grazing effects on fescue grassland soils[J]. Journal of Range Management, 1971, 24(3): 185–188
- [32] Taddese G, Saleem M A M, Abyie A, et al. Important of grazing on plant species richness, plant biomass, plant attribute and soil physical and hydrological properties of Vertisol in East African Highlands[J]. Environmental Management, 2002, 29(2): 279–289
- [33] Hou F J, Chang S H, Yu Y W, et al. A review on trampling by grazed livestock[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 133–139